

УДК 681.518.52: 622.24.054.33

## МЕТОДИ І ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕФЕКТИВНОСТІ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН ЕЛЕКТРОБУРАМИ

А.О.Семенцова, Л.О.Копистинський

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727167,

e-mail: [kafatp@nuing.edu.ua](mailto:kafatp@nuing.edu.ua)

Стаття присвячена розробленню методів і приладів контролю енергетичних параметрів електробурів. На підставі вивчення фізичної сутності взаємозв'язків енергетичних параметрів процесу буріння з площею вибою свердловини розглянуто роботу долота за певного питомого тиску на гірничу породу, що створюється осевим навантаженням на долото, і розроблено алгоритм функціонування критеріїв для контролю моменту на валі двигуна і швидкості його обертання на основі інформації про спожиту потужність системою «струмовідвід – електробур». Розроблено функціональні схеми приладів для контролю енергетичних параметрів занурних двигунів та описано алгоритми їх функціонування. Наведено аналіз статистичних характеристик моменту на долоті у процесі буріння свердловин електробурами. Визначено оцінку автокореляційної функції для моменту на долоті, а також спектральну густину.

Ключові слова: електробури, потужність, крутий момент, засоби контролю, свердловина.

Статья посвящена разработке методов и приборов контроля энергетических параметров электробуров. На основании изучения физической сущности взаимосвязей энергетических параметров процесса бурения с площадью забоя скважины рассмотрена работа долота при определенном удельном давлении на горную породу, создаваемая осевой нагрузкой на долото, и разработан алгоритм функционирования критериев для контроля момента на валу двигателя и скорости его вращения на основе информации о потребляемой мощности системы «токоотвод – электробур». Разработаны функциональные схемы приборов для контроля энергетических параметров погружных двигателей и описаны алгоритмы их функционирования. Приведен анализ статистических характеристик момента на долоте при бурении скважин электробурами. Определена оценка автокорреляционной функции для момента на долоте, а также спектральная плотность.

Ключевые слова: электробуры, мощность, крутящий момент, средства контроля, скважина.

The article deals with the development of the methods and devices for controlling energy parameters of electrodrills. Based on studying the physical nature of the relationships between energy parameters of drilling process and a face area of the well the bit operation was considered under specific pressure on the mining rock created by axial weight on drilling bit and the algorithm of the operation criteria was shown for the torque control on the engine shaft and its rotation speed taking into account the data about the consumed power by the system "conductor cable – electric drill". The devices functional schemes have been developed for controlling energy parameters of the bottom hole engines and the algorithms of their operation have been described as well. The analysis of the statistic characteristics of the torque was presented during drilling operation on the bit using electrodrills. The autocorrelation function has been estimated for the torque on the bit and the spectral density has been calculated.

Keywords: electric drills, capacity, rotation torque, means of control, well.

**Вступ.** Відомо, що найпоширенішим способом буріння нафтових і газових свердловин є роторний, коли долото закріплене на нижньому кінці колони бурильних труб, а колона обертається за допомогою привода, розташованого на поверхні землі. Паралельно з роторним способом, починаючи з 1909 р., коли Дудніковський і Потворський (Австро-Угорщина) вперше запропонували апарат для глибокого обертального буріння у вигляді електродвигуна, безпосередньо з'єднаного зі шнеком у долотом, який опускався у свердловину на канаті з електрокабелем, розвинулась принципово нова технологія буріння за допомогою заглибних трифазних асинхронних олієнаповнених двигунів з короткозамкненим ротором [1, 2]. Згодом ця система була замінена системою ДПТ (два проводи – труба), в якій одним із проводів є колона бурильних труб, а в подальшому замість колони бурильних труб було розроблено безперервно намотуваний трубопровід. Створення технології буріння електробурами мало на меті зменшення витрат на буріння свердловин за рахунок відсутності безперервного обертання колони бури-

льних труб (підвищення надійності процесу буріння). Буріння похилих і, навіть горизонтальних керовано-спрямованих свердловин із впровадженням електричного способу передачі енергії на вибій свердловин є найбільш досконалим. Практично за всіма показниками ефективність класичного електробуріння з двигуном, що опускається в свердловину на загвинчуваних трубах, перевищує інші способи буріння [1]. Ведуться дослідження у напрямку підвищення надійності стурмопідведення шляхом переходу на живлення двигуна електробура постійним струмом, а також застосування гідродоставки кінцевика суцільного кабеля до електробура наприкінці спуско-підймальних операцій через звичайну колону бурильних труб [3 та ін.].

У відповідності із сказаним, заслуговують на увагу розробки електробурового комплексу, в якому двигун електробура є одночасно і наступним джерелом інформації про вибійний буровий процес. Відомо, що двигун електробура може одночасно використовуватись в інформаційній системі, де інформація про роботу

долота, отримана через електричний канал, дає перші відомості про розбурювану породу, про енергетичні параметри та ефективність застосованого режиму буріння.

Отже, синтез ефективних засобів контролю енергетичних показників процесу буріння нафтових і газових свердловин електробурами є актуальною науково-практичною задачею у зв'язку з інтенсивним впровадженням в галузі ІТ-технологій. Можливість оперативного отримання з вибою під час буріння даних про параметри режиму буріння дає змогу ставити ці дані у відповідності з досвідом буріння, зафіксованим в базах даних інформаційної системи, та згідно цього корегувати план робіт на свердловині. Відзначимо, що накопичення подібної інформації з родовища в цілому та по регіонах створює підґрунтя для підвищення якості нових технічних проектів на буріння свердловин та інтелектуальних систем керування процесом буріння.

**Аналіз стану досліджень та публікацій.** Аналіз літературних джерел [1÷9 та ін.] свідчить про недостатній обсяг проведених досліджень у напрямку створення технічних засобів контролю енергетичних показників процесу буріння нафтових і газових свердловин сучасними електробурами, зокрема моменту на валі. За інформацією про електричні параметри приводного електродвигуна встановлено три методи контролю моменту на валу виробничих механізмів:

- з використанням закону Ампера шляхом прямого або непрямого вимірювання індукції;
- з використанням еквівалентних схем двигуна і кабеля з урівноваженням еквівалентної схеми за модулем струму або за модулем і фазою струму;
- з використанням енергетичних діаграм привода до струму, що споживає двигун, за значенням добутку активної потужності двигуна на ККД, за потужністю, яку споживає двигун.

Останній метод є найбільш поширеним і ґрунтується на використанні різних алгоритмів функціонування пристроїв контролю:

$$M_B = K_1(P - P_0);$$

$$M_B = K_2(P - P_0 - \Delta P); \quad \Delta P = I^2(r_d + r_k);$$

$$M_B = K_1(P - P_0) / K_2 n_d;$$

$$M_B = K_1(P - P_0 - \Delta P) / K_2 n_d;$$

$$M_B = K_1(P - P_0 - \Delta P) / K_2 n_d;$$

$$K_2 n_d = K_0 n_0 - K_4 P_B;$$

$$M_B = (K_2 F n_d - P_0) / K_2 n_d,$$

- де  $P$  – потужність, яку споживає двигун;  
 $P_0$  – потужність неробочого ходу;  
 $\Delta P$  – втрати потужності;  
 $I$  – струм навантаження електродвигуна;  
 $r_d$  – опір обмоток статора двигуна;  
 $r_k$  – опір кабеля довжиною від двигуна до точки вимірювання;

$P_B$  – потужність на валі двигуна;

$n_d$  – швидкість обертання двигуна;

$n_0$  – швидкість обертання двигуна при неробочому ході;

$F$  – осьове навантаження на долото;

$K_1, K_2, K_3, K_4$  – коефіцієнти пропорційності.

Проте, ці алгоритми не враховують чинники, характерні для процесу буріння свердловин електробурами, такі як втрати потужності на тертя в шпинделі (2-4 кВт), втрати потужності в несиметричному струмопідводі (два проводи – труба), втрати потужності в оливнонаповненому двигуні електробура, а також вплив ковзання двигуна, яке може відхиляється від номінального значення на 5÷6 %.

**Виділення невирішених частин.** Невирішеною є проблема створення пристроїв для контролю потужності, крутного моменту занурного двигуна електробура та швидкості його обертання.

**Формування цілі.** Метою даної є розроблення методів і пристроїв контролю потужності, крутного моменту двигуна електробура і швидкості його обертання, призначених для функціонування в складі сучасних систем контролю і керування процесом буріння нафтових і газових свердловин в умовах нестационарності і поточної невизначеності щодо структури і параметрів об'єкта.

**Результати.** Одним із основних питань при бурінні глибоких нафтових і газових свердловин електробурами є питання про величину потужності, крутного моменту та швидкості обертання двигуна електробура, що необхідні для ефективної роботи долота. Дослідженнями [2] доведено, що параметрами, які достатньо повно характеризують занурний двигун електробура, є номінальна потужність  $P_{ном}$ , номінальний  $M_{ном}$  і максимальний  $M_{max}$  моменти, які віднесені до одиниці площі  $S_{виб}$  вибою свердловини:

$$\frac{P_{ном}}{S_{виб}}; \frac{M_{ном}}{S_{виб}}; \frac{M_{max}}{S_{виб}}.$$

Відношення  $P_{ном}/S_{виб}$  характеризує рівень питомої потужності, яка витрачається на буріння і значною мірою визначає механічну швидкість буріння  $V$ . Окрім цього, величина  $P_{ном}$  визначає ступінь нагрівання електродвигуна в реальних умовах охолодження.

Відношення  $M_{ном}/S_{виб}$  визначає величину тривало допустимого осьового навантаження  $F$  на долото. Відношення  $M_{max}/S_{виб}$  визначає перевантажувальну здатність двигуна, яка має особливе значення під час буріння в породах, що обумовлюють імпульсний характер зміни моменту опору на долоті і, по суті, визначає граничне значення осьового навантаження, з яким можна вести буріння.

Для з'ясування фізичної сутності взаємозв'язків вказаних вище енергетичних параметрів

рів від площі вибою свердловини скористаємося підходом, викладеним у роботі [2], і розглянемо роботу лопатевого долота при певному питомому тиску  $\sigma$  на гірничу породу, що створюється осьовим навантаженням на долото. Для цього момент  $M$ , що потрібний для обертання долота, вважатимемо пропорційним діаметру долота  $d$  і осьовому навантаженню  $F$ , тобто

$$M = cdF, \quad (1)$$

де  $c$  – коефіцієнт, який характеризує взаємодію долота з вибоєм свердловини.

Оскільки осьове навантаження  $F$  можна записати як

$$F = b\sigma d, \quad (2)$$

де  $b$  – ширина леза долота,

то крутний момент при  $\sigma = \text{const}$  дорівнюватиме

$$M = cb\sigma d^2. \quad (3)$$

З метою підвищення зручності енергетичної оцінки процесу буріння перетворимо вираз (3), ввівши в нього  $\pi$ . Тоді маємо

$$M = c_1 b \sigma \pi d^2, \quad (4)$$

де  $c_1 = c/\pi$ .

З урахуванням виразу (4) запишемо формули для визначення потужності, необхідної для обертання долота:

$$P = Mn = c_1 b \sigma \pi d^2 n, \quad (5)$$

де  $n$  – швидкість обертання долота;

енергії, що витрачається за час роботи долота  $t$

$$W = c_1 b \sigma \pi d^2 n t, \quad (6)$$

та питомих витрат енергії

$$W_{\text{пит}} = \frac{4W}{h\pi d^2} = \frac{4c_1 b \sigma n t}{h}, \quad (7)$$

де  $h$  – проходка долота.

Якщо залежність проходки  $h$  від механічної швидкості буріння  $v$  при  $F = \text{const}$  і  $n = \text{const}$  виразити як  $h = vt$ , тоді

$$W_{\text{пит}} = \frac{4W}{vt\pi d^2} = \frac{4P}{v\pi d^2}, \quad (8)$$

або

$$P = \frac{W_{\text{пит}} v \pi d^2}{4}, \quad (9)$$

і

$$v = \frac{4P}{W_{\text{пит}} \pi d^2}. \quad (10)$$

Отже, механічна швидкість буріння електробуром прямо-пропорційна потужності, що підведена до долота, і обернено-пропорційна площі вибою свердловини та питомій витраті енергії на одиницю вибуреної породи.

Проте, вираз (10) є справедливим лише при  $n = \text{const}$ ,  $h = vt$ . Із зміною потужності  $P$ , що обумовлено зміною швидкості  $n$ , зміняться питомі витрати енергії  $W_{\text{пит}}$ , тобто при  $P = \text{const}$  і  $n = \text{var}$ , механічна швидкість буріння буде різною для різних значень швидкості обертання  $n$ .

Такий енергетичний підхід до оцінки процесу буріння свердловин електробурами під-

тверджено [2] для буріння також тришарошковими долотами і електробурами різних типорозмірів. Досвід буріння довів також, що при  $M_{\text{max}}/M_{\text{ном}} \geq 2,2$  забезпечується режим буріння в різних геологічних умовах різними долотами при будь-яких допустимих осьових навантаженнях на долото. Слід відзначити, що для алмазних доліт доцільна швидкість обертання для більшості гірських порід складає 700 об/хв і більше, а для шарошкових менша, тобто в межах 70÷300 об/хв.

Важливим питанням при експлуатації електробурів є безперервний контроль потужності і крутного моменту на валу електробура, а також швидкості обертання долота. Виходитимемо з того, що існує взаємозв'язок між енергетичними та інформаційними аспектами контролю процесу буріння свердловин електробурами. Тому в основу запропонованого методу контролю енергетичних показників процесу буріння покладена гіпотеза про наявність деякої відповідності між спектральною структурою сигналу і ймовірнісним уявленням спостережача про цей сигнал. Дійсно, спектру потужності стаціонарного сигналу, що є об'єктивною характеристикою його енергетичної структури, можна поставити у відповідність апостеріорний розподіл ймовірностей деякої гіпотези про властивості або зміст цього сигналу. Ця відповідність виявляє двоїстість спектральних характеристик часових процесів: з одного боку вони відображають об'єктивні закони розподілу енергії по частотах, а з другого, ймовірнісне уявлення деякого ідеального «спостережача» про властивості спостережуваного сигналу.

Відзначимо, що відомі пристрої для вимірювання крутного моменту містять давач активної потужності, суматор і компенсатор сигналу, пропорційного потужності неробочого ходу електродвигуна. Проте, вони не дозволяють вимірювати момент з урахуванням втрат потужності в струмопідводі великої довжини та в оливнонаповненому двигуні.

Тому доцільним є зменшення похибки вимірювання від активних втрат в струмовідводі і в електродвигуні. Це досягається тим, що запропонований пристрій забезпечено коригуючим ланцюгом, який містить послідовно з'єднаний квадратор, елемент множення, подільовач і суматор, а також другий елемент множення, який підключено паралельно до першого елемента множення і подільовачу між квадратором і суматором. Вхід квадратора керуючої ланки приєднаний до струмового входу давача активної потужності, а вихід суматора цього ланцюжка – до основного суматора (рис. 1).

Напруга  $U_1$  на виході давача активної потужності, який під'єднаний до ланцюга живлення електродвигуна, пропорційна вимірюваній потужності  $P_{\text{вим}}$

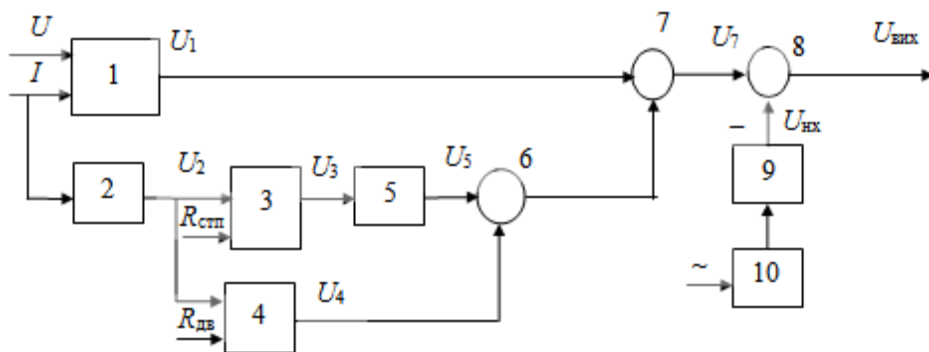
$$U_1 = k_1 \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \equiv P_{\text{вим}}, \quad (11)$$

де  $U_1$  – фазова напруга;

$I$  – фазовий струм;

$\cos\varphi$  – коефіцієнт потужності;

$k_1$  – коефіцієнт пропорційності.



1 – давач активної потужності; 2 – квадратор; 3, 4 – схеми множення; 5 – дільник; 6, 7 – суматори; 8 – компенсатор напруги, яка відповідає потужності неробочого ходу електродвигуна, що сформульована в елементі 9; 10 – джерело живлення

**Рисунок 1 – Блок-схема пристрою для вимірювання крутного моменту на валі занурного електродвигуна**

Сигнал, пропорційний фазовому струму, подається також на квадратор, напруга на виході якого  $U_2$  пропорційна квадрату вхідного сигналу

$$U_2 = k_2 \cdot I^2 \equiv I^2, \quad (12)$$

де  $k_2$  – коефіцієнт пропорційності.

В елементах множення 3 та 4 напруга з виходу квадратора помножується на величини, що пропорційні відповідно опору струмопідводу занурного електродвигуна  $R_{стп}$  і активного опору обмоток електродвигуна  $R_{дв}$ . Параметри схеми 3 вибирають з урахуванням зміни опору струмопідводу внаслідок підвищення температури в залежності від глибини свердловини.

Отже, на виході елемента множення 3 сигнал є пропорційним втратам в струмовідводі з максимальним питомим опором

$$U_3 = k_3 \cdot I^2 R_{стп\max}, \quad (13)$$

а на виході елемента 4 – пропорційний втратам у двигуні

$$U_4 = k_4 \cdot I^2 R_{дв}, \quad (14)$$

де  $k_3$  і  $k_4$  – коефіцієнти пропорційності.

Оскільки втрати в струмовідводі залежать від площі перерізу кабелю, то сигнал з виходу елемента множення подається на вхід подільника 5, у якому напруга ділиться пропорційно питомому опору струмовідводу, тобто

$$U_5 = \frac{k_3 I^2 R_{стп\max}}{k_{дл}} = k_5 I^2 R_{стп} \equiv P_{стп}, \quad (15)$$

де  $k_{дл}$  – коефіцієнт, який враховує питомий опір струмовідводу при різних площах перерізу;

$k_5 = k_3 / k_{дл}$  – коефіцієнт пропорційності.

У суматорі 6 напруги  $U_4$  і  $U_5$  додаються, а у суматорі 7 ця сума віднімається із напруги, яка пропорційна виміряній потужності на поверхні свердловини

$$U_7 = U_1 - (U_4 + U_5) = k_7 [P_{вим} - (P_{стп} + P_{дв})] = k_7 P_{вд}, \quad (16)$$

де  $P_{вд}$  – потужність на валі занурного двигуна електробура.

Із виразу (16) бачимо, що на виході суматора 7 напруга пропорційна потужності на валі

занурного двигуна з урахування втрат в струмовідводі і в електродвигуні. Тоді момент на валу двигуна можна визначити з виразу:

$$M = \frac{974 \cdot P_{вд}}{n} = k_6 \cdot P_{вд}, \quad (17)$$

де  $k_6 = 974/n$ .

У режимі неробочого ходу момент на валу електродвигуна дорівнює нулю, хоча він і споживає деяку потужність із мережі. Для компенсації напруги, що відповідає потужності неробочого ходу електродвигуна, служить компенсатор 8.

Під час навантаження валу двигуна вхідна напруга компенсатора  $U_{вх}$  дорівнює

$$U_{вх} = K [P_{вим.н} - (P_{стп.н} + P_{дв.н})], \quad (18)$$

тобто пропорційна поточному значенню потужності.

Для визначення моменту на валу електродвигуна необхідно із напруги, що пропорційна поточному значенню потужності, відняти напругу, яка пропорційна потужності неробочого ходу двигуна. При цьому момент на валі у двигуна пропорційний цій різниці при постійній швидкості занурного двигуна

$$M = \gamma (P_{вим.н} - P_{вим.нх}) - [(P_{стп.н} + P_{дв.нх}) - (P_{стп.нх} + P_{дв.н})] = \gamma P_{вим}, \quad (19)$$

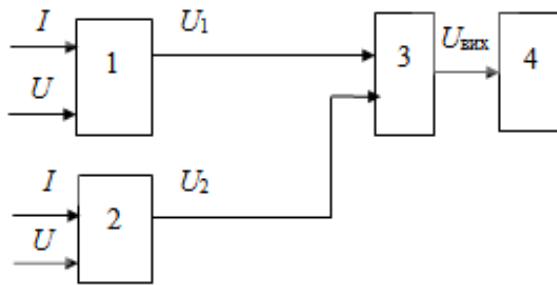
де  $\gamma$  – коефіцієнт пропорційності.

Оскільки розроблений пристрій має автоматичну компенсацію втрат у струмовідводі і в електродвигуні, напруга на виході компенсатора, яка пропорційна приросту виміряної потужності  $\Delta P_{вим}$ , що дорівнює потужності на валу двигуна, пропорційна крутному моменту занурного електродвигуна.

Для вимірювання швидкості занурних електродвигунів використовують тахогенератори, що пов'язані з валом двигуна, сигнали з яких передаються лінією зв'язку на наземний вимірювальний пристрій [2]. Проте, при глибинах свердловин більше 3000 м такі пристрої мають велику додаткову похибку внаслідок сильного затухання сигналу і низьку надійність. Тому подібні пристрої використовуються для вимі-

рування швидкості обертання занурних двигунів лише на невеликих глибинах.

Нами запропоновано пристрій для вимірювання швидкості обертання вала занурного електродвигуна [5], що має підвищену надійність, яка досягнута за рахунок вимірювання швидкості обертання занурного електродвигуна на основі використання наземних параметрів без тахогенератора, пристрою вводу сигналів в лінію зв'язку і лінії зв'язку. Це досягається тим, що такий пристрій побудований на основі вимірювальних перетворювачів активної потужності і моменту, що під'єднані до системи електроспоживання занурного електродвигуна (рис. 2).



**Рисунок 2 – Блок-схема пристрою для вимірювання швидкості валу зачурного електродвигуна**

Пристрій містить перетворювач 1 активної потужності, перетворювач 2 моменту, подільувач 3 і вимірювальний пристрій 4. Напруга  $U_1$  на виході перетворювача 1 активної потужності пропорційна виміряній потужності  $P_{\text{вим}}$  (11), тобто  $U_1 = k_1 P$ . Напруга  $U_2$  на виході перетворювача 2 пропорційна крутному моменту на валі занурного електродвигуна

$$U_2 = K_2 M, \quad (20)$$

де  $K_2$  – коефіцієнт пропорційності.

3 виходів перетворювачів 1 і 2 сигнали надходять на входи подільника 3, в якому напруга  $U_1$  ділиться на напругу  $U_2$ . Оскільки потужність двигуна зв'язана з моментом на валі виразом (17) та на виході подільника 3 отримаємо напругу  $U_{\text{вих.}}$ , що пропорційна швидкості обертання  $n$  зчужного електродвигуна

$$U_{\text{вих}} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{K_1 P}{K_2 M} = K_3 n. \quad (21)$$

Ця напруга надходить на вхід реєструючого пристрою наземного вимірювального пристрою 4. Розроблений пристрій може бути використаний для вимірювання швидкості обертання занурних двигунів електробурів і електронасосів у нафтогазовидобувній галузі промисловості. Використання пристрою (рис. 2) дозволяє підвищити також точність вимірювання крутного моменту на валі занурного електродвигуна. На рис.3 наведено блок-схему запропонованого пристрою.

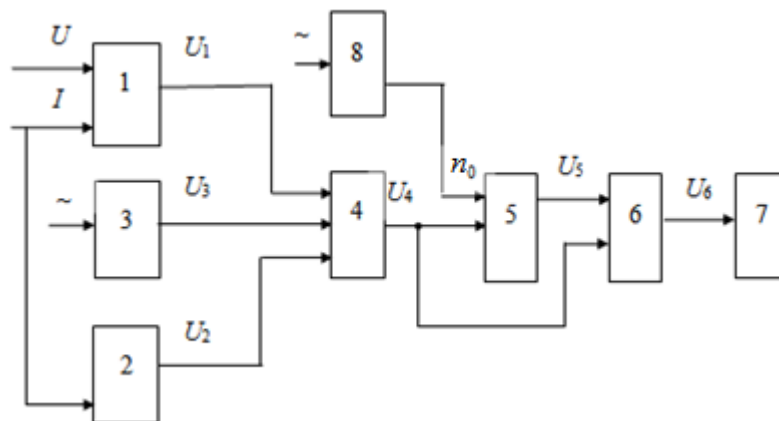
Він містить давач 1 активної потужності, корегуючий ланцюжок 2, компенсатор 3, суматори 4 і 5, подільовач 6, ресструючий пристрій 7 і задавач 8 синхронної частоти обертання двигуна. Напруга  $U_1$  на виході давача 1 активної потужності, підключеного до системи електроживлення (на рис. не показана) занурного електродвигуна, пропорційна потужності, що вимірюється на поверхні  $U_1 \equiv P_{\text{вим.}}$ . Сигнал, пропорційний значенню фазового струму, подається на корегуючий ланцюжок 2, вихідне значення напруги  $U_2$  якого пропорційне втратам потужності в струмовідводі  $\Delta P_{\text{ст.}}$  і в двигуні  $\Delta P_{\text{дв}}$ .

$$U_2 \equiv \Delta P_{\text{сп}} + \Delta P_{\text{дв}}. \quad (22)$$

В основному суматорі 4 із напруги  $U_1$  віднімається  $U_2$ . У режимі неробочого ходу крутний момент занурного електродвигуна дорівнює нулю, хоча він і споживає певну потужність із мережі. Для компенсації сигналу, який відповідає потужності неробочого ходу електродвигуна, слугує компенсатор 3, вхід якого з'єднаний з джерелом електроживлення (на схемі рис. 3 не показано), а вихід – з основним суматором 4.

Отже, в основному суматорі 4 із сигналу, пропорційному вимірянній на поверхні споживаної потужності віднімаються сигнали, пропорційні потужності неробочого ходу занурного електродвигуна ( $U_3$ ), втратам потужності в струмовідводі і в двигуні. Вихідна напруга основного суматора 4, яка пропорційна потужності на валі занурного електродвигуна

$$U_4 = U_1 - U_2 - U_3 = K_1 P_B \equiv P_B, \quad (23)$$



**Рисунок 3 – Блок-схема пристрою для вимірювання крутного моменту на валі занурного електродвигуна підвищеної точності**



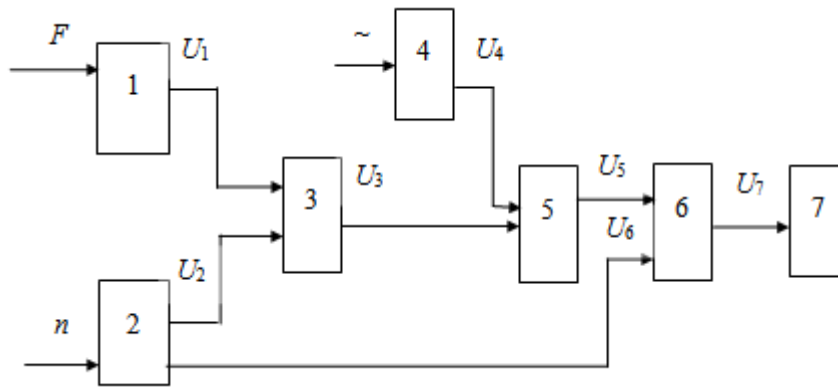


Рисунок 4 – Блок-схема пристрою для вимірювання крутного моменту на долоті при роторному способі буріння

подається на вхід суматора 5, на вхід якого подається також сигнал, пропорційний синхронній частоті обертання занурного електродвигуна  $n_0$  від задавача 8, вхід якого з'єднаний з джерелом живлення занурного електродвигуна.

Оскільки у робочій частині механічної характеристики занурного електродвигуна ковзання  $S$  пропорційне потужності на його валу

$$P_B = CS, \quad (24)$$

де  $C$  – коефіцієнт пропорційності між потужністю і ковзанням двигуна  $S = (n_0 - n)/n$ ,

то можна записати, що

$$n = n_0 - n_0 S, \quad (25)$$

або

$$n = n_0 - kP_B, \quad (26)$$

де  $K$  – коефіцієнт пропорційності.

У додатковому суматорі 5 із сигналу, пропорційного синхронній частоті обертання двигуна, віднімається сигнал, пропорційний потужності на валу, тобто реалізується алгоритмом (26). Вихідна напруга додаткового суматора 5, що пропорційна поточному значенню швидкості  $n$  занурного електродвигуна

$$U_5 = k_2 n, \quad (27)$$

подається на вхід подільника 6. На його другий вхід подається сигнал від основного суматора 4, який пропорційний потужності на валі двигуна. В подільнику 6 здійснюється операція ділення сигналу, пропорційного потужності на валі  $U_4$ , на сигнал, пропорційний частоті обертання занурного електродвигуна. Вихідна напруга  $U_6$  цього пристрою [6] пропорційна крутному моменту на валу занурного електродвигуна, що передається долоту з урахуванням похибки, викликані зміною ковзання, подається на вхід реєструючого пристрою 7

$$U_6 = \frac{U_4}{U_5} = \frac{K_1 P_B}{K_2 n} = K_3 M_d. \quad (27)$$

Вимірювання цього пристрою дозволяє підвищити точність вимірювання крутного моменту на валу занурного двигуна.

Для вимірювання крутного моменту на долоті при роторному способі буріння запропоновано пристрій, який враховує втрати потужності на обертання колони бурильних труб до того,

як долото торкнулося вибою свердловини та зміну частоти обертання долота.

На рис. 4 наведено блок-схему пристрою для вимірювання крутного моменту на долоті при роторному бурінні.

Пристрій містить давач 1 осьового навантаження на долото, давач 2 швидкості обертання долота, блок 3, задавач сигналу 4, пропорційного втратам потужності на обертання колони до торкання долотом вибою свердловини, суматор 5, подільник 6 та індикатор 7. Напруга  $U_1$  на виході давача 1 осьового навантаження на долото, яка пропорційна поточному значенню осьового навантаження  $F$

$$U_1 = K_1 F, \quad (28)$$

де  $K_1$  – коефіцієнт пропорційності, подається на вхід блоку множення 3. Напруга  $U_2$  на виході давача 2 швидкості обертання долота, яка пропорційна поточному значенню швидкості обертання долота  $n$

$$U_2 = K_2 n, \quad (29)$$

де  $K_2$  – коефіцієнт пропорційності, також подається на вхід блоку множення 3. Вихідне значення напруги  $U_3$  пристрою 3 пропорційне потужності керування

$$U_3 = U_1 \cdot U_2 = K_1 K_2 F n = K_3 N, \quad (30)$$

де  $K_3 = K_1 K_2$  – коефіцієнт пропорційності;

$N$  – потужність керування без урахування втрат потужності на обертання колони до торкання долотом вибою свердловини, надходить на вхід суматора 5.

На другий вхід суматора 5 подається напруга  $U_4$  від задавача 4 сигналу, пропорційного втратам потужності  $N_0$  на обертання колони до торкання долотом вибою свердловини

$$U_4 = K_4 N_0, \quad (31)$$

де  $K_4$  – коефіцієнт пропорційності.

У суматорі 5 здійснюється операція віднімання із величини напруги  $U_3$  напруги  $U_4$ :

$$U_5 = U_3 - U_4 = K_3 N - K_4 N_0 = K_5 N_d, \quad (32)$$

де  $K_5$  – коефіцієнт пропорційності;

$N_d$  – потужність на долоті.

Вихідний сигнал суматора 5 подається на вхід подільника 6, на другий вхід якого надходить сигнал від давача швидкості обертання долота 2

$$U_6 = K_6 n. \quad (33)$$

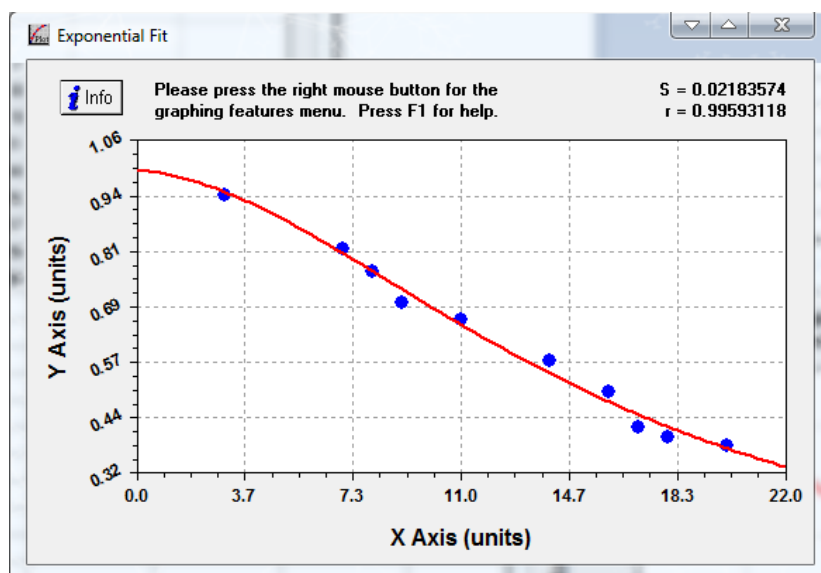


Рисунок 5 – Графік нормованої автокореляційної функції для моменту на долоті

У пристрої 6 здійснюється операція ділення напруги, пропорційної потужності на долоті, на напругу, яка пропорційна швидкості його обертання

$$U_7 = \frac{K_5 N_g}{K_6 n} = K_7 M_d, \quad (34)$$

де  $K_7 = K_5 / K_6$  – коефіцієнт пропорційності;  
 $M_d$  – крутний момент на долоті.

Вихідна напруга  $U_7$  подається на індикатор 7. Пристрій може бути використаний для вимірювання моменту на долоті на бурових установках як з дизельним, так і з електричним приводом.

За допомогою запропонованого алгоритму і пристрою (рис. 3) для вимірювання крутного моменту отримано бази даних про зміни моменту на долоті під час буріння свердловини №803Д електробуром Е170-8 №774 долотом 2К190ТЗ №337 в інтервалі 1858-1863 м в однорідних піщаниках верхньомілітової підсвіти з постійним осьовим навантаженням на долото 85 кН.

Для знаходження оцінок математичного сподівання, дисперсії та середньоквадратичного відхилення досліджуваного параметру скористалися програмою MathCad, замінивши  $M_{\text{дол}}$  на  $K$ .

Математичне сподівання:

$$\text{mean}(K) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n K_i = 397.914$$

$$m := \text{mean}(K).$$

Дисперсія

зміщена оцінка:

$$\text{var}(K) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (K_i - m)^2 = 2.206 \cdot 10^4;$$

незміщена оцінка:

$$\text{Var}(K) = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (K_i - m)^2 = 2.252 \cdot 10^4.$$

Середньоквадратичне відхилення  
зміщена оцінка:

$$\text{Stdev}(K) = \sqrt{\text{var}(K)} = 148.516;$$

незміщена оцінка:

$$\text{Stdev}(K) = \sqrt{\text{Var}(K)} = 150.055.$$

Ці характеристики для кожного конкретного моменту є середніми з множини й визначаються одномірним законом розподілу. Для визначення автокореляційної функції використали програму MathCad. Отримали графік нормованої автокореляційної функції  $R_{xx}(m)$  (рис. 5).

Графік автокореляційної функції підтверджує, що досліджуваний стохастичний процес  $M(t)$  є стаціонарним і ергодичним. Відтворили автокореляційну функцію в програмі Curve Expert для підтвердження, що дана функція є найкращою для нашого випадку. Проаналізувавши три рівняння, вибираємо експоненціальне рівняння:

$$R_{xx}(k) = De^{\alpha \tau}, \quad (35)$$

де  $D = 1,065$ ;  $\alpha = -4.781$ .

Як бачимо, графік повністю відтворює вище наведену автокореляційну функцію з коефіцієнтом кореляції  $r = 0,996$  і стандартною похибкою  $S = 0,021$ .

Відзначимо, що при статистичному аналізі стаціонарних випадкових функцій зручно користуватись спектральною густиною випадкової функції, яка є додатною функцією у всьому діапазоні частот від 0 до  $\infty$  та не містить відомостей про фази окремих гармонійних складових.

Застосовуючи до кореляційної функції  $R(\tau) = De^{-\alpha(\tau)}$  перетворення, визначили спектральну густину за формулою:

$$S(\omega) = 2 \int_0^{\infty} De^{-\alpha(\tau)} \cos \omega \tau d\tau = \frac{2D\alpha}{\alpha^2 + \omega^2}, \quad (36)$$

або

$$S(\omega) = \frac{10,195}{22,87 + \omega^2} \quad (37)$$

За отриманими даними побудували залежність  $S$  від  $\omega$ , використовуючи програму MathCad.

$$\begin{aligned} rxx_{k-1} &:= Rxx(k) \\ z &:= cfft(rxx) \\ i &:= 0..length(z)-1 \\ S_i &:= |z_i| \\ w_i &:= i \end{aligned}$$

Для рівняння (28) графік спектральної густини зображений на рис.6.

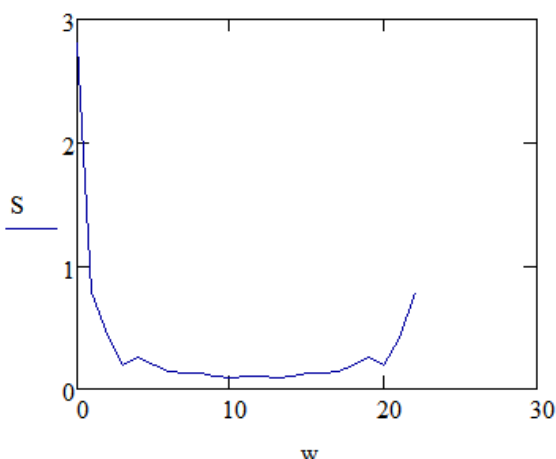


Рисунок 6 – Графік спектральної густини для моменту на долоті

**Висновок.** Розроблено пристрої для вимірювання активної потужності занурного двигуна електробура, моменту на його валі, а також моменту на долоті і швидкості його обертання, які можуть бути використані для вимірювання крутного моменту і швидкості обертання не тільки електробурів, але й занурних електронасосів у нафтовій і газовій промисловості. У сукупності з давачем механічної швидкості буріння може бути отримана інформація про твердість розбурюваних порід про знос опор і озброєння долота, зони з аномальними пластовими тисками та інша інформація.

### Література:

- 1 Бунчак З. Електробур. Парадокси і реальність / З.Бунчак, О.Дудар, О.Кекот, О.Турянський // Електроінформ. – 2003. – № 4. – С. 8-11.
- 2 Фоменко Ф.Н. Бурение скважин электробуром / Ф.Н.Фоменко. – М.: Недра, 1974. – 272 с.
- 3 Байдюк Б.В. Ще раз про перспективи створення в Україні технології буріння свердловин, конкурентоспроможної на світовому ринку / Б.В.Байдюк, Р.С.Яремійчук // Нафта і газ України–2000: збірник наук.праць; матеріали 6-ої між нар.наук-практич.конф, Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2000. – Т. 2. – С. 11-13.

4 АС 465568 Устройство для измерения крутящего момента погружного электродвигателя / А.Г.Бестелесный, А.О.Семенцова, Г.Н.Семенов, В.М.Дитчук. – № 1908929/18-10; заявл. 20.04.73; опубл. 30.03.75, бюл. № 12. – 2 с.

5 АС 584248 Устройство для измерения скорости вращения погружного электродвигателя / А.О.Семенцова, Г.Н.Семенов. – № 2335198/18-10; заявл. 15.03.76; опубл. 15.12.77, бюл. № 46. – 2 с.

6 АС 678352 Устройство для измерения крутящего момента погружного электродвигателя / А.О.Семенцова, Г.Н.Семенов. – № 2495075/18-10; заявл. 13.06.77; опубл. 15.08.79, бюл. № 29. – 3 с.

7 АС 832075 Устройство для измерения крутящего момента долоте / Г.Н.Семенов, А.О.Семенцова. – № 2654377/22-03; заявл. 9.08.78; опубл. 23.05.81, бюл. № 19. – 3 с.

8 Абизбаев Б.И. Электробур обеспечивает получение достаточной забойной информации для эффективного управления процессом бурения / Б.И.Абизбаев, Б.В.Байдюк // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – ВНИИОЭНГ. – № 10. – 1996. – С. 7-12.

9 Семенцова А.О. Результаты анализа статистических характеристик моменту на долоті при бурінні свердловин електробурами / А.О.Семенцова, А.В.Плитус, Л.О.Копистинський, О.В.Гутак // DNY VEDY – 2013: materialy IX mezinarodni vedecko-prakticna konferenc, Dil 36 Technicke vedy, Praha: Publishing Hause “Education and Science” s.r.o. – 2013. – P. 61-69.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
18.10.13

Рекомендована до друку  
професором **Костишиним В.С.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
професором **Тодорцевим Ю.К.**  
(Одеський національний політехнічний  
університет, м. Одеса)